

УДК 681.518.5

## МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МОНІТОРИНГУ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Бабак В.П., член-кореспондент НАН України,  
доктор технічних наук, професор  
*Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ*

Ключові слова: моніторинг, енергоефективність, шумова діагностика, тепловий потік, контроль, діагностика.

Процеси теплообміну в природі відбуваються неперервно та присутні у всіх сферах діяльності людства. Більшість фізичних, хімічних, біологічних або інших процесів, пов'язаних з перетворенням одних видів енергії в інші, супроводжуються виділенням або поглинанням теплоти. Тому інформація про значення параметрів теплових ефектів та характер перебігу теплофізичного процесу є однією з основних як при наукових дослідженнях, так і для оптимізації або контролю виробничих процесів. Дослідження та модернізація теплоенергетичних об'єктів, енергоємних технологій, впровадження нових енергоефективних матеріалів тісно пов'язані з вимірюванням теплофізичних характеристик, оперативним контролем і регулюванням параметрів теплофізичних процесів. В сучасному світі тотальної інформатизації на перше місце виходять інформаційні, а при реалізації вимірювань – інформаційно-вимірювальні технології, які є сукупністю методів вимірювання, апаратних і програмно-технічних засобів, інтегрованих з метою збирання, опрацювання, зберігання, відображення і використання вимірювальної інформації у вигляді результатів вимірювання з певним рівнем їх невизначеності в інтересах споживачів. Застосування сучасного моніторингу та оптимізація теплофізичних процесів забезпечують найбільш ефективно впровадження заходів з ресурсозаощадження та енергозбереження, що безумовно має економічну та соціальну значимість. Системний підхід до вирішення питань вимірювання параметрів теплофізичних процесів включає формування мір відповідних фізичних величин, створення методів та засобів моніторингу, а також розроблення їхнього метрологічного забезпечення. За кожним із цих аспектів авторами отримано нові науково-практичні рішення.

Метою роботи є оприлюднення результатів робіт з розроблення методів та технологій визначення параметрів теплофізичних процесів, а також засобів інформаційно-вимірювальної техніки для моніторингу стану об'єктів контролю та теплофізичних властивостей матеріалів. Для досягнення поставленої мети удосконалено фундаментальні основи теорії вимірювання, зокрема запропоновано новий концептуальний підхід до розуміння синтезу і аналізу процедур і операцій вимірювань [1], розроблено науково-практичні засади та методологічний апарат еталонної бази забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку, що забезпечує покращення експлуатаційних та метрологічних характеристик засобів визначення теплофізичних властивостей речовин та параметрів процесів. Предметні сфери застосування моніторингу

теплофізичних процесів потребують забезпечення достовірності вимірювань, зокрема, поверхневої густини теплового потоку, в інтервалі вимірюваних значень від кількох одиниць до сотень тисяч  $\text{Вт/м}^2$ . В Україні метрологічно забезпечено вимірювання в діапазоні  $10 \dots 105 \text{ Вт/м}^2$ , що обмежує можливості застосування значної кількості відповідних засобів вимірювання та стримує розвиток нових методів контролю і діагностики за тепловими параметрами та впровадження інноваційних технологій та матеріалів. Для вирішення цієї проблеми розроблено концептуальну модель еталону поверхневої густини теплового потоку, яка базується на системному підході до аналізу фізичних принципів відтворення одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку, встановлено адекватні межі їх застосування за доступністю реалізації з одночасним забезпеченням мінімальної невизначеності вимірювань, виявлено і досліджено фактори впливу, що обумовлюють невисоку точність відтворення одиниці густини теплового потоку та визначено шляхи мінімізації їх впливу, а також створено методи передавання розміру одиниці вимірювання, способи реалізації простежуваності результатів вимірювання поверхневої густини теплового потоку та встановлено вимоги до апаратної частини засобів метрологічного забезпечення вимірювань [2]. Для реалізації концептуальної моделі еталону поверхневої густини теплового потоку запропоновано модульний принцип побудови з використанням різних фізичних способів формування та передавання теплової енергії: в діапазоні  $1 \dots 50 \text{ Вт/м}^2$  – формування за допомогою моделі абсолютно чорного тіла та передавання радіаційним способом; в діапазоні  $2 \cdot 10^1 \dots 2 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$  – формування за допомогою електричного нагрівника та передавання кондуктивним способом; в діапазоні  $1 \cdot 10^4 \dots 2 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$  – формування за допомогою випромінювача та передавання радіаційним способом, що задовольнить потреби теплових вимірювань у різних галузях наукових і прикладних досліджень. При цьому апаратний модуль реєстрації, передавання та опрацювання вимірювальної інформації залишається єдиним для всіх піддіапазонів.

Створено математичну модель вимірювання поверхневої густини теплового потоку, як функцію невизначеності умов формування однорідного у просторі і стаціонарного у часі теплового потоку на чутливій поверхні засобу вимірювання, та запропоновано оптимізацію процесу формування одиниці вимірювання за критерієм мінімуму невизначеності, що дозволило забезпечити точність реалізації одиниці вимірювання у встановлених межах. В результаті на порядок розширено нижню та верхню межі робочого діапазону вимірювань, що відповідає світовому рівню метрологічного забезпечення вимірювань поверхневої густини теплового потоку. На цій основі створено і впроваджено низку методів та систем моніторингу теплофізичних процесів на всіх етапах життєвого циклу об'єктів теплоенергетики: від генерування теплової енергії, транспортування, до споживання; будівництва та визначення характеристик матеріалів для авіації та космонавтики, харчової галузі, тощо [2]. Вирішено важливу науково-технічну проблему з розвитку наукових засад розроблення та практичного застосування інноваційних методів і систем моніторингу теплофізичних процесів, що є індикаторами

стану та ефективності функціонування об'єктів контролю, зокрема, теплотехнічного обладнання як джерела генерування теплової енергії, теплопроводів, будівель як споживачів теплової енергії, а також довкілля об'єктів теплоенергетики [2].

Здійснено моделювання сенсорів теплового потоку, що є первинними перетворювачами в системах моніторингу, контролю і діагностики та чутливими елементами теплофізичних приладів. Сенсори теплового потоку представлено як гетерогенні тіла із замкненими включеннями з контрастною теплопровідністю, з урахуванням чого встановлено функціональну залежність вихідного сигналу сенсора від теплового потоку. Це дозволило розробити методи аналізу нестационарних та високоінтенсивних теплових процесів, та запропонувати нові моделі сенсорів теплового потоку для систем моніторингу та діагностування енергетичного обладнання [3]. Обґрунтовано та досліджено методи відбору діагностичних ознак, що ґрунтуються на дисперсійному та покроковому дискримінантному аналізі, які дозволили проводити порівняльний аналіз ознак за їх діагностичною цінністю, сформулювати критерії оптимальної розмірності векторів ознак та обґрунтувати використання нових ознак. Розроблено метод дослідження статистичних характеристик діагностичних ознак з урахування виду їх законів розподілу, що дозволило розробити методику нормалізації розподілу імовірності діагностичних ознак за допомогою перетворення Джонсона, отримати рівняння щільності розподілів імовірності ознак, що значно розширює область задач діагностування, які вирішуються, підвищити точність визначення порогового рівня та достовірність оцінювання стану енергетичного обладнання [3]. Розроблено та апробовано метод і математичні моделі прямих та обернених задач ультразвукового контролю та діагностики складних металевих конструкцій на наявність дефектів. Виготовлено та експериментально перевірено дослідний зразок системи магнітострикційного контролю елементів досліджуваних об'єктів. Проведено математичне моделювання процесів ультразвукового контролю з використанням програмного середовища MATLAB та COMSOL Multiphysics. Адекватність математичних моделей обґрунтована результатами їх порівняння з реальними фізичними експериментами. Розроблено інформаційне забезпечення та методика, що його реалізує, які забезпечують функціонування засобів контролю вказаних об'єктів на основі використання малоапертурних магнітострикційних перетворювачів [2]. Для забезпечення надійного та безперебійного постачання теплової енергії споживачам із заданими технологічними параметрами розроблено метод та систему моніторингу теплового стану просторово розгалужених тепломереж із застосуванням комплексу апаратно-програмних засобів формування тепловізійних зображень на базі безпілотних літальних апаратів (квадрокоптерів). В роботах [1, 3] представлено метод відображення на коло результатів вимірювання різних фізичних величин, які отримують під час руху сенсорів в околі об'єктів контролю по замкненим траєкторіям, що дозволяє виконувати аналіз результатів вимірювання методами статистичних кутових спостережень. Запропонована методика опрацювання даних в інформаційно-

вимірювальних системах на основі безпілотних літальних апаратів, що базується на апроксимації емпіричної щільності ймовірності кутових даних і дозволяє визначити розширені невизначеності середніх кутів найбільш інтенсивної зміни у просторі різних фізичних величин за умови апіорної невизначеності розподілу генеральної сукупності і незалежно від його симетрії та кількості мод. На етапі споживання теплової енергії актуальним стає моніторинг теплового опору огорожувальних конструкцій будівель. Контроль теплоізоляційних характеристик огорожувальних конструкцій проводять при проведенні енергетичної сертифікації будівель і впровадженні енергоефективних заходів. Для його забезпечення розроблено методику та інформаційно-вимірювальну систему моніторингу теплового опору будівель [2]. Перевагами створеної системи є розширення діапазону вимірювання теплового потоку; зменшення тривалості проведення одного циклу випробувань всієї споруди за рахунок застосування комбінованого методу дослідження; зниження похибки вимірювання у порівнянні з існуючими аналогами; можливість розширення різних за характеристиками та локацією точок контролю за рахунок модульності побудови системи та застосування сучасних технологій передавання даних. Крім того, на етапі будівництва та термомодернізації будівель важливим є контроль теплофізичних характеристик матеріалів, зокрема коефіцієнту теплопровідності, що призвело до створення теплотричних методів та засобів контролю якості теплоізоляційних матеріалів.

Розроблено метод прогнозування параметрів довкілля з використанням дискретного перетворення Фур'є та створено мобільну комп'ютеризовану інформаційно-вимірювальну систему на базі mesh-мережі з віддаленими сенсорами і дистанційним передаванням експериментальних даних та їх статистичним аналізом, в тому числі, з використанням безпілотних літальних апаратів, що відкриває шлях до широкого впровадження систем моніторингу теплофізичних процесів в Україні [3]. Створено структуру вимірювального модулю системи mesh-мережі екологічного моніторингу довкілля як елемента концепції Smart City, що дозволило провести калібрування вимірювальних модулів в режимі реального часу для задач моніторингу енергетичних та екологічних параметрів енергетичних об'єктів. Розроблені системи, прилади, методики вимірювань і розрахунків та про-грамне забезпечення впроваджені та використовуються на низці підприємств України.

Список використаних джерел

1. Моделі та міри у вимірюваннях: Монографія / за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака. – К.: Наукова думка, 2019. – 208 с.

2. Апаратно-програмне забезпечення моніторингу об'єктів генерування, транспортування та споживання теплової енергії: Монографія / за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака / – К.: ІТТФ НАН України, 2016. – 298 с.

3. Babak V.P., Babak S.V., Myslovych M.V., Zaporozhets A.O., Zvaritch V.M. Diagnostic Systems for Energy Equipments. Studies in Systems, Decision and Control, vol 281. - Springer, Cham. – 2020.